

УДК 539.3

doi:10.20998/2413-4295.2017.32.01

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАКЕТА КОРПУСА БРОНЕТРАНСПОРТЕРА

**М. А. БОНДАРЕНКО<sup>1\*</sup>, Е. В. ПЕЛЕШКО<sup>2</sup>, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, А. В. ГРАБОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
Р. В. ГРАБОРОВ<sup>3</sup>, Ю. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК<sup>2</sup>, В. В. ПОСОХОВ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Кафедра «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> ООО «БІІР Україна», Одесса, УКРАИНА

<sup>3</sup> ООО «Управляющая Компания РэйлТрансХолдинг», Мариуполь, УКРАИНА

<sup>4</sup> Кафедра «Ремонт и эксплуатация автомобилей и боевых машин», Национальная академия Национальной гвардии Украины, Харьков, УКРАИНА

\*email: marina.bondarenko@tmm-sapr.org

**АННОТАЦИЯ** Проведена верификация компьютерной динамической модели корпуса бронетранспортера путем сопоставления результатов численных и экспериментальных исследований макета. Методика экспериментальных исследований включала испытания на вибрационном стенде и определение реакции конструкции на импульсное воздействие с помощью обрезиненного инструмента. Определено, что динамические характеристики, полученные экспериментальным путем, находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с численными результатами. С использованием верифицированных конечно-элементных моделей проведены проверочные исследования натурного образца корпуса БТР-3Е, которые подтвердили корректность разработанных математических и численных моделей, а также точность полученных результатов.

**Ключевые слова:** бронетранспортер; динамические характеристики; экспериментальные исследования; численные исследования; макет; метод конечных элементов.

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DYNAMIC MODEL VERIFICATION OF PERSONNEL ARMORED CARRIER HULL

**M. BONDARENKO<sup>1</sup>, E. PELESHKO<sup>2</sup>, A. VASILIEV<sup>1</sup>, A. GRABOVSKIY<sup>1</sup>, R. GRABOROV<sup>3</sup>,  
YU. VERETELNYK<sup>2</sup>, V. POSOHOV<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> LLC "BIIR Ukraine", Odessa, UKRAINE

<sup>3</sup> JSC "Science Engineering Center UK "RailTransHolding", Mariupol, UKRAINE

<sup>4</sup> Department "Repair and operation of cars and military vehicles", National academy of the National guards of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** For dynamic computer model verification of the armored personnel carrier hull comparison of numerical and experimental studies results of its model was carried out. Upper belt of the armored personnel carrier hull was chosen for carrying out of experiment because it is the most loaded part. Experimental research method includes tests on the vibrating bench and determination of structure reaction to the impulse action with help of a rubberized tool. On the vibrating bench the natural frequencies and modes of oscillation was fixed. As a result of the second part of experiment, vibration displacement, vibration velocity and vibration acceleration were obtained at studied points, varying in time. Obtained during experimental research frequencies, shapes and relations describing response of the hull model to impact force are represented. It is determined that the dynamic characteristics obtained experimentally are in good qualitative and quantitative conformity with numerical results of modeling using the finite element method. Based on experimental data, damping factor was determined for the design model. With use of verified finite element models, testing of the full-scale specimen of BTR-3E was carried out. It confirms correctness of developed mathematical and numerical models, accuracy of obtained results.

**Keywords:** armored personnel carrier; dynamic characteristics; experimental research; numerical research; model; finite element method.

### Введение

В настоящее время в отечественной промышленности наблюдается тенденция внедрения информационных технологий и замены ручных расчетов компьютерным моделированием. В частности, расчет (в различных постановках) тонкостенных конструкций, как таковых, которые имеют широкое применение, является актуальной задачей [1–4]. Современные программные

комплексы, в которых реализованы численные методы для моделирования процессов и состояний, имеют внутренние средства контроля точности получаемых результатов. Тем не менее, наиболее достоверным с точки зрения полноты, точности и соответствия полученных результатов моделированию поведению реальных объектов является стадия экспериментальных исследований. При этом ключевым является именно этап сопоставления результатов численных и

экспериментальных исследований, который служит обоснованием параметров создаваемых численных моделей или причиной их корректировки вплоть до полной замены.

С этой целью в данной статье предлагается сопоставить результаты численных и экспериментальных исследований макета бронетранспортера БТР-80. Разработанная методика экспериментальных исследований включает испытания на вибрационном стенде и определение реакции конструкции на импульсное воздействие с помощью обрезающего инструмента.

Для проведения эксперимента рассмотрен верхний пояс корпуса бронетранспортера как его наиболее нагруженная часть. Верхний пояс корпуса представляет собой сварную тонкостенную пространственную конструкцию и состоит из подбашенного, передних, боковых и задних листов, верхней части моторно-трансмиссионного отделения. Макет корпуса изготовлен из листов металла толщиной 1,5 мм методом электродуговой сварки и имеет следующие габаритные размеры: длина – 810 мм, ширина – 310 мм, высота – 33 мм. Вес полученной конструкции – 3,3 кг.

#### Испытания на вибрационном стенде

Экспериментальные исследования собственных частот и форм колебаний корпуса проводились на стенде генераторе колебаний, оснащённом генератором сигналов ГЗ-120, рис. 1 [5,6].



Рис. 1 – Используемая аппаратура:

а) – генератор сигналов ГЗ-120; б) – усилитель сигнала; в) – генератор колебаний

Таким образом, сигнал, создаваемый генератором сигналов, проходит через усилитель и подается на генератор колебаний, а оттуда передается непосредственно объекту исследований, закреплённому на базовой плите. Макет, подготовленный для проведения эксперимента, представлен на рис. 2. В результате проведения эксперимента зафиксированы собственные частоты и формы колебаний.

Численное моделирование собственных частот и форм колебаний. Сравнение результатов, полученных экспериментальным и численным путем. Полученные экспериментальным путем динамические характеристики были сопоставлены с результатами численного моделирования с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ANSYS Workbench [7,8].



Рис. 2 – Макет фрагмента корпуса БТР-80

Дифференциальное уравнение свободных колебаний является отдельным случаем общего уравнения движения:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \quad (1)$$

где  $[K]$  и  $[M]$  – матрица жесткости и матрица масс, соответственно.

В анализе свободных колебаний предполагается упругое поведение конструкции, поэтому ожидаемый отклик является гармоническим:

$$\{x\} = \{\varphi_i\} \cos(\omega_i \cdot t), \quad (2)$$

где  $\{\varphi_i\}$  – форма колебаний  $i$ -той моды (собственный вектор);  $\omega_i$  – собственная частота для этой моды.

Подстановкой в предыдущее уравнение получается уравнение для нахождения собственных частот:

$$([K] - \omega_i^2 \cdot [M])\{\varphi_i\} = 0. \quad (3)$$

Геометрическая и конечно-элементная (количество конечных элементов – 8,3 тыс.) модели макета корпуса бронетранспортера представлены на рис. 3, 4 соответственно. Заданные граничные условия – жесткая заделка в областях модели, соответствующих местам крепления макета на базовой плите.

В табл. 1 приведены некоторые зафиксированные экспериментально собственные формы и собственные частоты колебаний макета корпуса и соответствующие им численные результаты. Видно, что экспериментальные данные и результаты численных исследований находятся в хорошем качественном соответствии. Что касается количественных характеристик, то погрешность численных результатов находится в пределах 2÷10%, рис. 5.

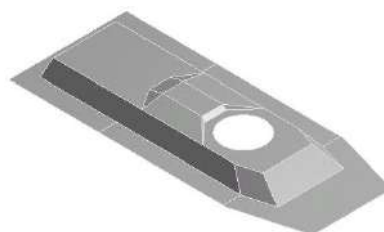
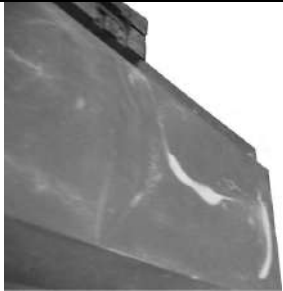
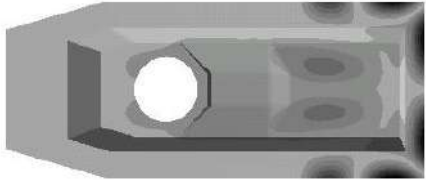

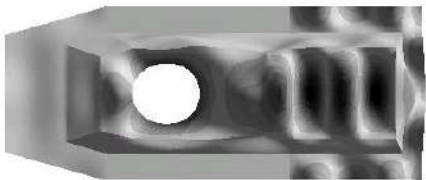




Рис. 3 – Геометрическая модель макета

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований

№	Форма колебаний экспериментальная	Форма колебаний расчетная
1	 600 Гц	 589,48 Гц
2	 980 Гц	 1004,5 Гц
3	 1210 Гц	 1225,6 Гц

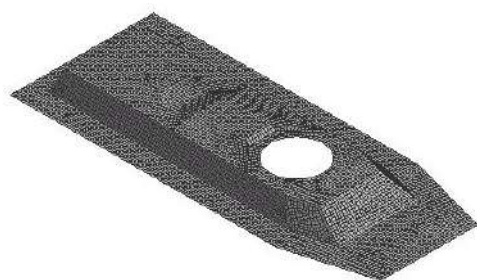


Рис. 4 – Конечно-элементная модель макета

#### Исследование собственных частот и форм колебаний при импульсном воздействии

В данном случае возбуждение колебаний макета корпуса осуществлялось воздействием обрезиненного ударника в области некоторых точек конструкции, рис. 6. Характерные точки конструкции выбирались исходя из результатов предварительного расчета ее собственных частот и форм колебаний, и являются местами возникновения наибольших перемещений. Частотные характеристики

определялись при помощи анализатора спектра вибраций, вибропреобразователя ДН-3-М1, рис. 7.

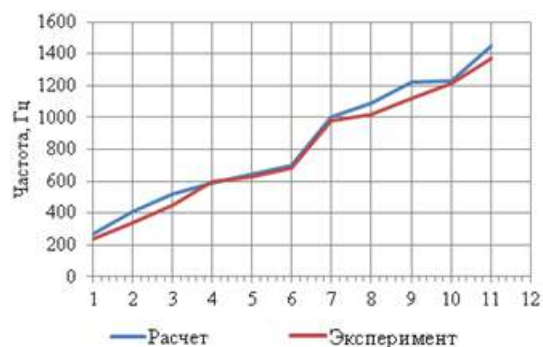


Рис. 5 – Сравнение собственных частот макета, полученных экспериментальным и расчетным путем

В качестве результата были получены виброперемещения, виброскорости и виброускорения в исследуемых точках, изменяющиеся во времени.

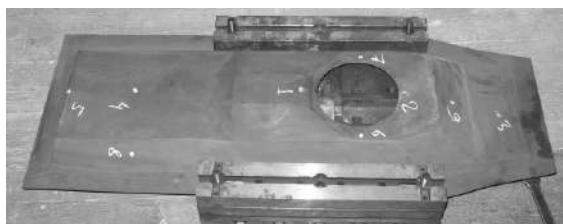


Рис. 6 – Места крепления датчика для фиксации экспериментальных данных

На рис. 8 – 16 в графической форме представлены полученные в ходе экспериментальных исследований зависимости, описывающие отклик макета корпуса на ударное воздействие.

Численное моделирование собственных частот макета при ударном воздействии. Колебательный процесс с учетом действия вязкого трения в изменении (1) имеет вид:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \quad (4)$$

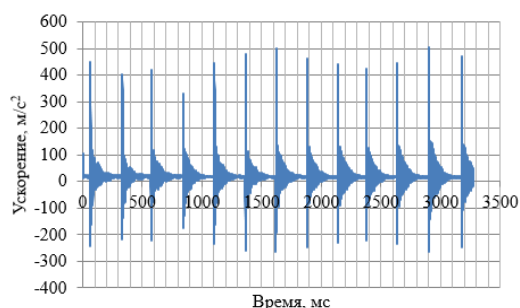


Рис. 8 – График распределения ускорений во времени в точке 4

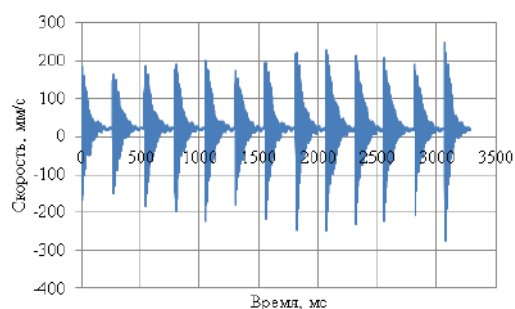


Рис. 9 – График распределения скоростей во времени в точке 4

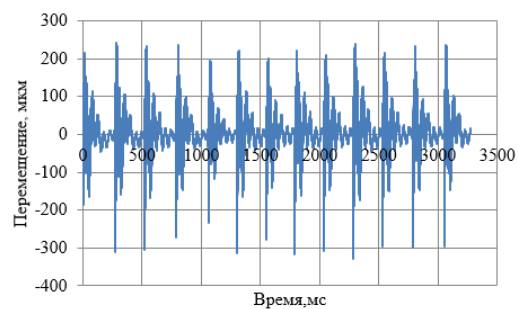


Рис. 10 – График распределения перемещений во времени в точке 4

где  $[C]$  – матрица демпфирования.

Предполагается действие в начальный момент времени импульса сил, после чего – свободные затухающие колебания системы. Для них характерно колебательное движение с затуханием размахов.



а)

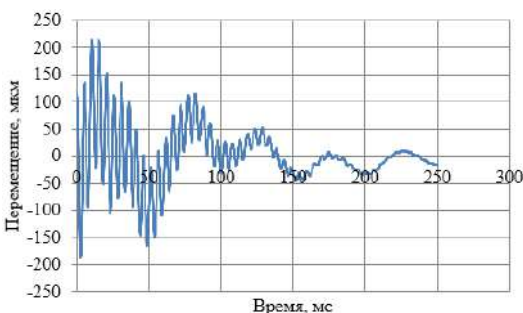
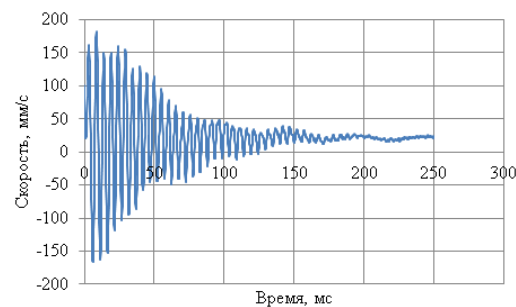
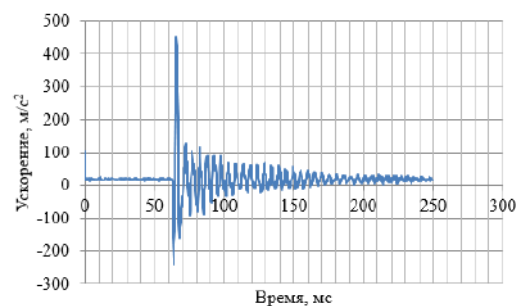


б)

Рис. 7 – Используемая аппаратура:  
а) – анализатор спектра вибраций 795М; б) – датчик ДН-3-М1

Огибающие графиков зависимости перемещений, скоростей и ускорений были описаны экспоненциальной функцией вида:

$$y_s = A \cdot e^{-bt}. \quad (5)$$



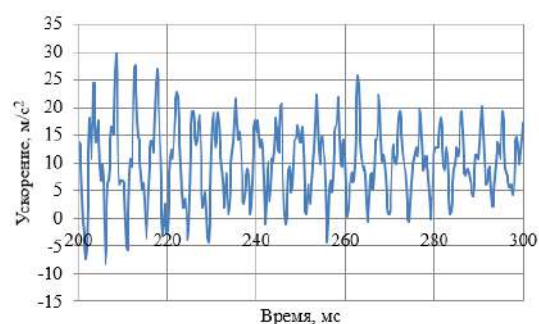
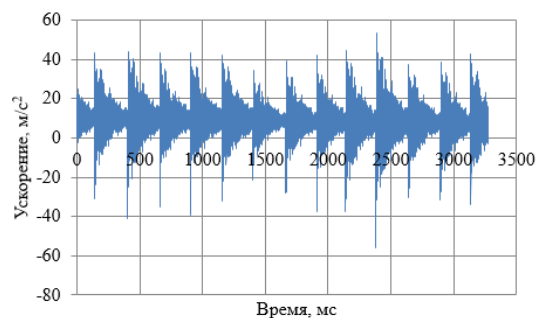


Рис. 11 – График распределения ускорений во времени в точке 8

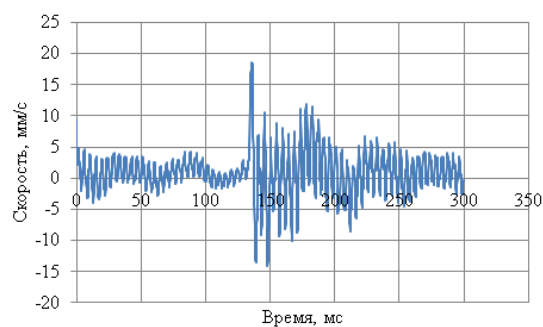
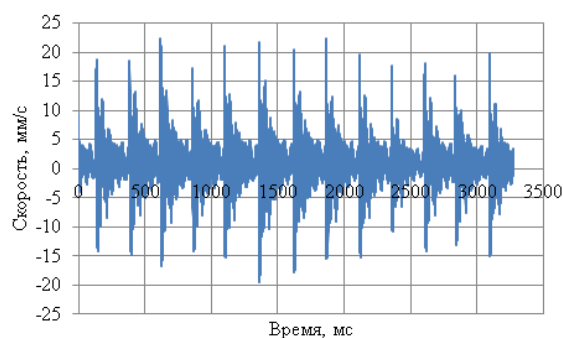


Рис. 12 – График распределения скоростей во времени в точке 8

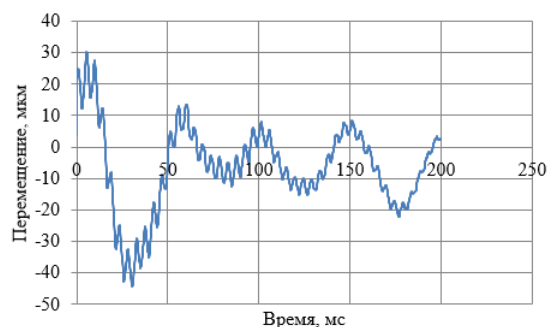
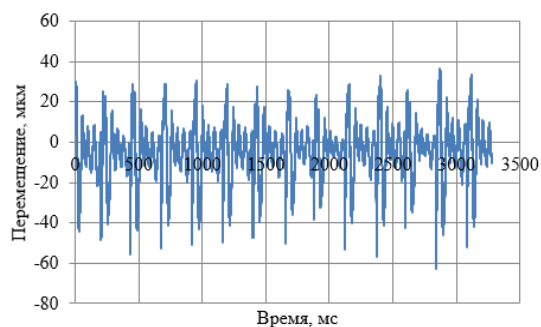


Рис. 13 – График распределения перемещений во времени в точке 8

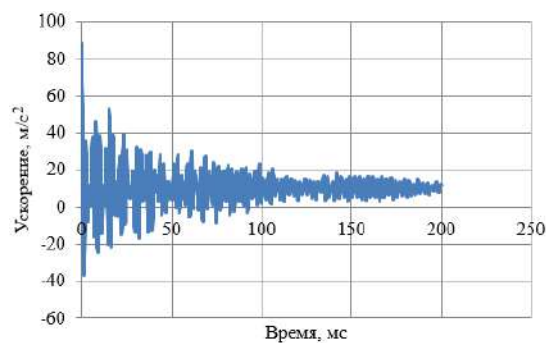
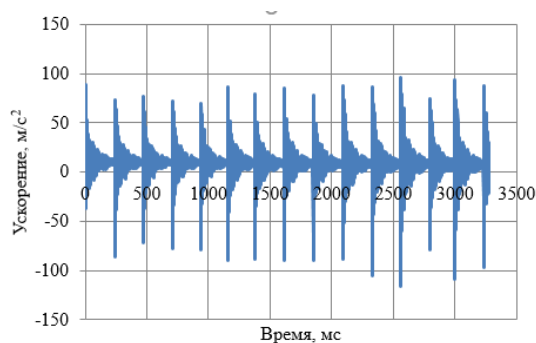


Рис. 14 – График распределения ускорений во времени в точке 9

Далее были вычислены коэффициенты затухания системы для рассматриваемых характеристик:

$$b = \ln(y_2/y_1)/(t_2 - t_1), \quad (6)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  – время;  $y_1$ ,  $y_2$  – значения описываемой

величины в момент времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Исходя из этих данных для расчетной модели был определен коэффициент демпфирования. На рис. 17 приведена зависимость коэффициента затухания для ускорений по времени в точке 4, полученного экспериментальным путем, от величины



коэффициента демпфирования, заложенного в расчетную модель. Учитывая, что затухание зависит от возбуждаемой частоты и коэффициент демпфирования, описывающий затухание системы при импульсном воздействии на нее, отличен в

разных точках, для расчетной модели был вычислен усредненный коэффициент демпфирования  $d = 0,07$ , обеспечивающий приемлемую точность численного анализа, рис. 17, 18.

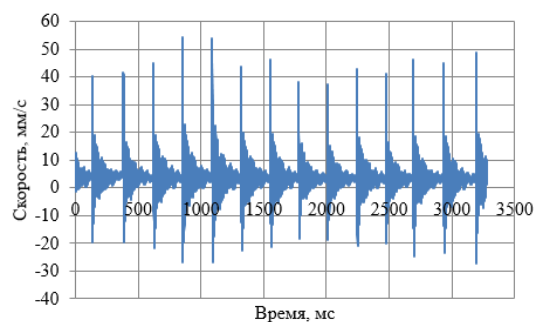


Рис. 15 – График распределения скоростей во времени в точке 9

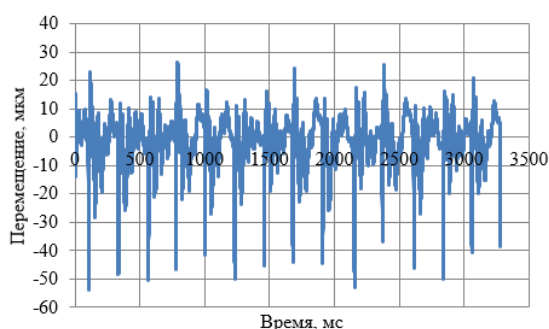
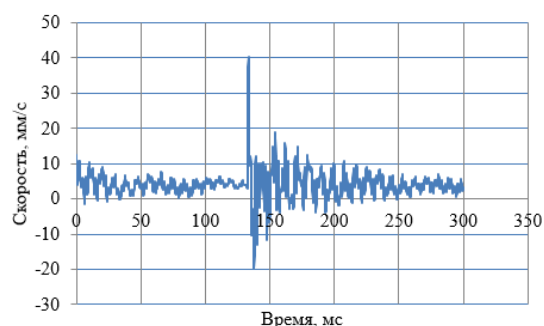


Рис. 16 – График зависимости перемещений от времени в точке 9

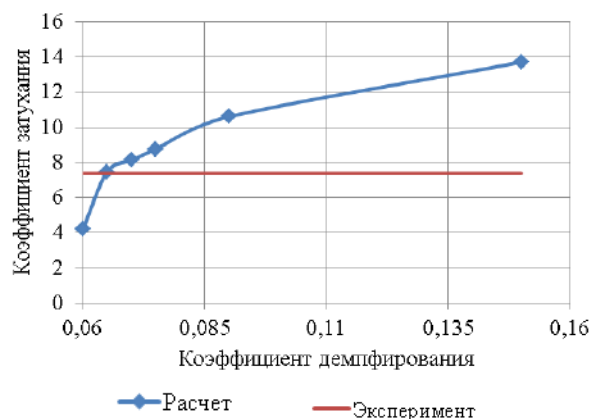
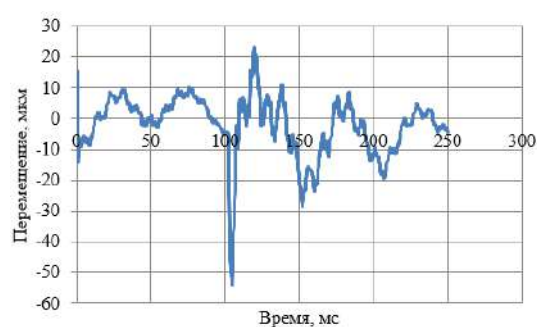


Рис. 17 – График зависимости коэффициента затухания от коэффициента демпфирования

#### Исследования натурального образца корпуса БТР-3Е

С использованием верифицированных конечно-элементных моделей были проведены исследования натурального образца. Ставилась цель путем варьирования проектных параметров панелей и элементов усиления достигнуть заданных прочностных и динамических характеристик

бронекорпуса БТР-3Е. Полученные в ходе исследования результаты, построенные модели, а также программное обеспечение были переданы на предприятие ПАО «Азовмаш», которое организовало серийное производство этих бронекорпусов. При этом в ходе технологической подготовки производства бронекорпусов созданные модели и программное обеспечение использовались для оценки прочностных и жесткостных характеристик в режиме многовариантных расчетов.

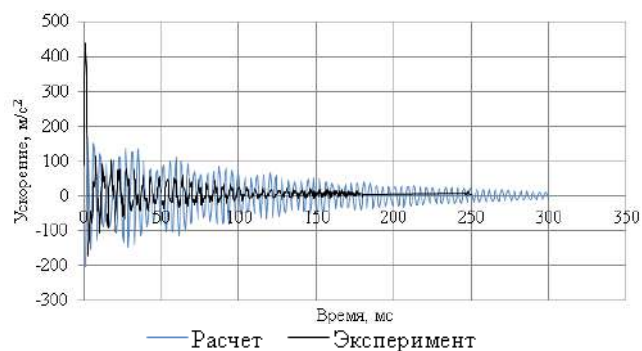


Рис. 18 – Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований

В итоге были обоснованы согласованные проектно-технологические решения по бронекорпусу БТР-3Е, которые обеспечивают выполнение комплекса требований тактико-технических характеристик. В частности, это относится к динамическим характеристикам при действии импульсной нагрузки.

Для проверки достоверности полученных расчетным путем результатов, а также обоснованности сделанных на их основе рекомендаций были проведены экспериментальные исследования на опытных образцах БТР-3Е [9,10].

Методика экспериментальных исследований предполагала импульсное воздействие на корпус в ряде точек, рис. 19, и фиксацию при помощи акселерометров временных распределений ускорений в этих точках. Данные, полученные расчетным и экспериментальным путем, были сопоставлены. Качественные характеристики расчетно-экспериментальных данных представлены на рис. 20.

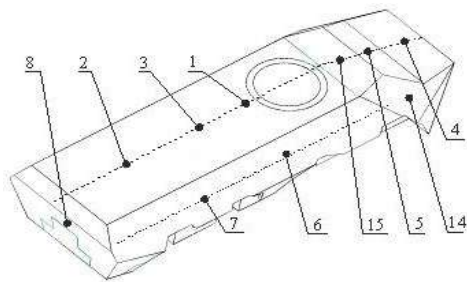


Рис. 19 – Точки фиксации виброускорений

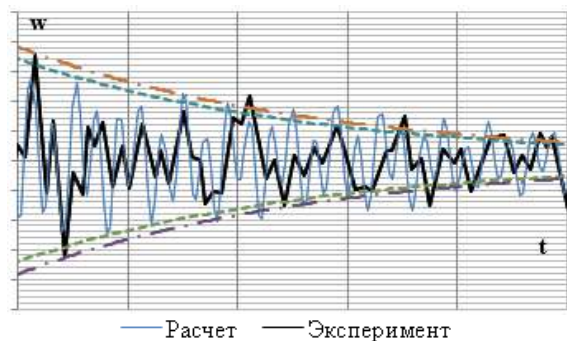


Рис. 20 – Характеристики временных распределений виброускорений в некоторой исследуемой точке, полученные экспериментальным и расчетным путем

Видно хорошее совпадение временных трендов изменения амплитуды затухающих колебаний. Что касается количественного соответствия результатов расчетных и экспериментальных исследований, то их отличие находится в пределах 8–12 % по частотам свободных колебаний и по логарифмическому декременту затухания. В частности, несоответствия вызваны тем, что на натурном объекте достаточно сложно возбудить моногармоническое воздействие – в отклике на удар присутствует целый спектр составляющих.

## Выводы

Таким образом, проведенные проверочные исследования подтвердили корректность разработанных математических и численных моделей, точность полученных результатов и обоснованность разработанных на их основе рекомендаций по обеспечению конструкционной прочности и динамических характеристик бронекорпусов отечественных легкобронированных машин.

Положительные результаты исследований демонстрируются также практикой эксплуатации БТР-3Е.

## Список литературы

- 1 Литвиненко, А. В. Метод линеаризации поверхности отклика в задаче обоснования проектных параметров тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / А. В. Литвиненко, Р. И. Шейченко, Р. В. Граборов, М. А. Бондаренко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Зб. наук. праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 31 (1074). – С. 88–99.
- 2 Шейченко, Р. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций / Р. И. Шейченко, Н. А. Ткачук, М. А. Бондаренко, Е. А. Лунев // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Машинобудування та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 12 (1234). – С. 137–145.
- 3 Thin-walled structures. – Great Britan: Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- 4 Kwok, Kawai. Mechanics of viscoelastic thin-walled structures. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology, 2013.
- 5 Пелешко, Е. В. К вопросу о расчетно-экспериментальном определении параметров численных моделей корпусов транспортных средств / Е. В. Пелешко, А. Ю. Васильев, Г. Д. Гриценко, С. Т. Бруль // *Вестник НТУ «ХПІ»*. Тем. вып.: Транспортное машиностроение. – 2007. – № 33. – С. 140–144.
- 6 Пелешко, Е. В. Расчетно-экспериментальные исследования реакции корпуса бронетранспортера на импульсные воздействия / Е. В. Пелешко // *Вестник НТУ «ХПІ»*. Тем. вып.: Машинознавство і САПР. – №33 – Вестник НТУ «ХПІ». – 2006. – С. 96–108.
- 7 Zienkiewicz, O. C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7<sup>th</sup> ed. / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Oxford: Butterworth-Heinemann. – 2013. – 756 pp.
- 8 Strang, G. An Analysis of the Finite Element Method / G. Strang, G. J. Fix – New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1973. – 351 p. – doi: 10.1137/1017062.
- 9 Литвиненко, А. В. Комплексные экспериментальные исследования динамических характеристик фрагментов, макетов и натурных образцов элементов бронекорпусов транспортных средств специального назначения / А. В. Литвиненко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 1(975). – С. 85–93.
- 10 Карапейчик, И. Н. Расширенная расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных

средств специального назначения / **И. Н. Карапейчик, А. В. Литвиненко, С. Т. Бруль, Н. А. Ткачук, А. Ю. Васильев** // *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Машиностроение и САПР.* – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 22. – С. 69–77.

#### Bibliography (transliterated)

- Litvinenko, A. V., Sheychenko, R. I., Graborov R. V., Bondarenko, M. A.** Metod linearizatsii poverhnosti otklika v zadache obosnovaniya proektnykh parametrov tonkostennykh elementov mashinostroitelnykh konstruktsey [Method of the response surface linearization in the task of design parameters justifying for thin-walled elements of engineering structure] *Visnik NTU «KhPI». Zb. nauk. prats. Seriya: Problemi mehanichnogo privodu. [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Mechanical drive Problems].* Kharkov: NTU «KhPI», 2014, **31**(1074), 88–99.
- Sheychenko, R. I., Tkachuk, N. A., Bondarenko, M. A., Lunev, E. A.** Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya innovatsionnykh tonkostennykh mashinostroitelnykh konstruktsey [Numerical simulation of stress-strain state of thin-walled innovative engineering structures] *Visnik NTU «KhPI». Seriya: Mashinobuduvannya ta SAPR [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Machine-building and CAD].* Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, **12** (1234), 137–145.
- Thin-walled structures. – Great Britan: Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- Kwok, Kawai** (2013) Mechanics of viscoelastic thin-walled structures. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology.
- Peleshko, E. V., Vasilev, A. Yu., Gritsenko, G. D., Brul, S. T.** K voprosu o raschetno-eksperimentalnom opredelenii parametrov chislennykh modeley korpusov transportnykh sredstv [On the problem of calculation and experimental determination of vehicles hulls numerical models parameters]. *Vestnik NTU «KhPI». Tem. vyip.: Transportnoe mashinostroenie [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Transport engineering].* Kharkov: NTU «KhPI», 2007, **33**, 140–144.
- Peleshko, E. V.** Raschetno-eksperimentalnyye issledovaniya reaktzii korpusa bronetransportera na impulsnyye vozdeystviya [Computational and experimental studies of the armored personnel carrier hull response to impulse actions] *Visnik NTU «KhPI». Seriya: Mashinobuduvannya ta SAPR [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Machine-building and CAD].* Kharkiv: NTU «KhPI», 2006, **33**, 96–108.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zhu, J.Z.** The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7<sup>th</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013, 756 pp.
- Strang, G., Fix, G. J.** An Analysis of the Finite Element Method. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1973, 351 pp. – doi: 10.1137/1017062.
- Litvinenko, A. V.** Kompleksnyye eksperimentalnyye issledovaniya dinamicheskikh harakteristik fragmentov, maketov i naturnykh obraztsov elementov bronekorpusov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya [Complex experimental studies of armored hulls elements dynamic characteristics on the special-purpose vehicles mock-ups fragments and full-scale samples] *Visnik NTU «KhPI». Seriya: Mashinobuduvannya ta SAPR [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Machine-building and CAD].* Kharkiv: NTU «KhPI», 2013, **1**(975), 85–93.
- Karapeychik, I. N., Litvinenko, A. V., Brul, S. T., Tkachuk, N. A., Vasilev A. Yu.** Rasshirennaya raschetno-eksperimentalnaya identifikatsiya parametrov chislennykh modeley korpusnykh elementov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya [Extended computational and experimental parameter identification of numerical models of special-purpose vehicles hull elements] *Visnik NTU «KhPI». Seriya: Mashinobuduvannya ta SAPR [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Machine-building and CAD].* Kharkiv: NTU «KhPI», 2012, **22**, 69–77.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Бондаренко Марина Александровна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин»; г. Харьков, Украина; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

**Maryna Bondarenko** – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", postgraduate student at the department of theory and computer aided design of mechanisms and machines, Kharkiv, Ukraine; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

**Пелешко Евгений Витальевич** – кандидат технических наук, инженер-конструктор ООО «БИИР Украина».

**Ievgen Pelesko** – candidate of technical sciences (Ph. D.), mechanical engineer at the BIIR Ukraine LLC; Odessa, Ukraine.

**Васильев Антон Юрьевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», докторант кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин»; г. Харьков, Украина; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Anton Vasiliev** – candidate of technical sciences (Ph. D.), National technical university "Kharkiv polytechnic institute", doctoral student at the department of theory and computer aided design of mechanisms and machines; Kharkiv, Ukraine; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Грабовский Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин»; г. Харьков, Украина; e-mail: Grabovskiy@tmm-sapr.org.

**Andrey Grabovskiy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher at the department of theory and computer aided design of mechanisms and machines; Kharkiv, Ukraine; e-mail: Grabovskiy@tmm-sapr.org.

**Граборов Роман Викторович** – начальник группы технических расчетов ООО Научно-инженерный центр УК «РэйлТрансХолдинг», г. Мариуполь, Украина.

**Roman Graborov** – chief of technical calculations group of the JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

**Веретельник Юрий Викторович** – кандидат технических наук, инженер-конструктор ООО «БИИР Украина».



**Yurii Veretelnik** – mechanical engineer at the BIIR Ukraine LLC; Odessa, Ukraine.

**Посохов Виталий Владимирович** – Национальная академия Национальной гвардии Украины, старший преподаватель кафедры «Ремонт и эксплуатация автомобилей и боевых машин»; г. Харьков, Украина.

**Vitaliy Posohov** – National academy of the National guards of Ukraine, senior professor at the department "Repair and operation of cars and military vehicles"; Kharkiv, Ukraine.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Бондаренко, М. А.** Расчетно-экспериментальная верификация динамической модели макета корпуса бронетранспортера / **М. А. Бондаренко, Е. В. Пелешко, А. Ю. Васильев, А. В. Грабовский, Р. В. Граборов, Ю. В. Веретельник, В. В. Посохов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 5-13. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.01.

*Please cite this article as:*

**Bondarenko, M., Peleshko, Ie., Vasiliev, A., Grabovskiy, A., Graborov, R., Veretelnik, Yu., Posohov, V.** Computational and experimental dynamic model verification of personnel armored carrier hull. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **32** (1254), 5–13, doi:10.20998/2413-4295.2017.32.01.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Бондаренко, М. О.** Розрахунково-експериментальна верифікація динамічної моделі макета корпусу бронетранспортера / **М. О. Бондаренко, Є. В. Пелешко, А. Ю. Васильєв, А. В. Грабовський, Р. В. Граборов, Ю. В. Веретельник, В. В. Посохов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 5-13. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.01.

**АНОТАЦІЯ** Проведена верифікація комп'ютерної динамічної моделі корпусу бронетранспортера шляхом порівняння результатів числових і експериментальних досліджень макета. Методика експериментальних досліджень включала випробування на вібраційному стенді і визначення реакції конструкції на імпульсний вплив за допомогою прогумованого інструменту. Визначено, що динамічні характеристики, отримані експериментальним шляхом, якісно і кількісно відповідають числовим результатам. З використанням верифікованих скінченно-елементних моделей проведені перевірочні дослідження натурного зразка корпусу БТР-3Е, які підтвердили коректність розроблених математичних і числових моделей, а також точність отриманих результатів.

**Ключові слова:** бронетранспортер; динамічні характеристики; експериментальні дослідження; числові дослідження; макет; метод скінченних елементів.

*Поступила (received) 08.09.2017*